

Bibliography (transliterated): 1. Korotkyh E.D. Application of glass lubricants for hot deformation of the workpiece E.D. Korotlyh, M.P. Ponomarev, B.I. Teleshev Forging and stamping production. – 1975. – No4 . – P. 9. 2. Korneev M.I. The use of glass protective coatings when punching blades from HRSA M.I. Korneev, I.G. Skugarev . – Moscow: Mechanical Engineering , 1966 . – 140 p. 3. Solntcev S.S. Protective coatings of metals by heating S.S. Solntcev, A.G. Tumanov. – Moscow: Mechanical Engineering, 1976. – 256 p. 4. Solntcev S.S. Protective coatings on heating: Handbook S.S. Solntsnv. – Moscow Book House »Librokom», 2009,– 248 p. 5. Grudev A.P. Friction and lubrication in metal forming A.P. Grudev, Y.V. Zilbert , V.T. Tilik . – Moscow: Metallurgy , 1982. – 310 p.

Поступила (received) 26.10.2014

УДК 621.73

В. В. КУХАРЬ, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ИЗГИБЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРОДОЛЬНО ПРИЛОЖЕННЫМИ СИЛАМИ

Аналитически рассмотрены процессы деформации при получении профилированных заготовок продольным изгибом для последующих завершающих операций объемной штамповки иликовки. Разработана методика расчета и установлены закономерности изменения относительного радиуса кривизны нейтрального слоя, смещения нейтральной линии деформаций и развития деформаций на внутреннем и наружном радиусе по биссектрисе угла изгиба цилиндрической заготовки при продольном изгибе в зависимости от таких основных параметров как степень деформации и соотношение габаритных размеров исходной заготовки.

Ключевые слова: продольный изгиб, цилиндрическая заготовка, профилирование, деформация, смещение нейтрального слоя, радиус кривизны, крайние волокна.

Введение. Изгиб заготовок продольно приложенными силами в процессах обработки металлов давлением (осадка, высадка, протяжка, производство гнутых профилей) долгое время рассматривали только как негативное явление, принимая технологические решения по его исключению. В большинстве случаев такие решения являются оправданными. Возникновение продольного изгиба у цилиндрических заготовок связано с потерей ими устойчивости, когда отношение диаметра D_0 к высоте L_0 заготовки (т.е. коэффициент контакта D_0 / L_0) меньше определенной критической величины, а прилагаемая сила достаточна для возникновения начального выпучивания и дальнейшего развития деформации. При осадке или высадке заготовок чаще оперируют обратным соотношением $m_0 = L_0 / D_0$ [1], т.е. относительной высотой заготовки. Однако в настоящее время предложен ряд технологических процессов, основанных на положительном использовании явления продольного изгиба, и проведено изучение закономерностей формоизменения заготовок с различной формой поперечного сечения [2–5]. При этом оценка

© В. В. Кухарь, 2014

деформационных процессов, протекающих по биссектрисе угла продольно изгибаемых цилиндрических заготовок, проведена не была.

Анализ последних исследований и литературы. Аналитически [6] и на основе результатов конечно-элементного моделирования [7] установлено, что при продольном изгибе зона сжатия в поперечных сечениях заготовки всегда больше зоны растяжения. В процессах осадки и высадки продольный изгиб исключают путем отрезки заготовок с относительной высотой m_0 , меньшей критической величины m_{kr} . В способах восстановления длинномерных деталей осадкой В. А. Огородников [8] и Д. В. Хван [9] на основе энергетического метода определили условия появления продольного изгиба и предложили решения проблемы обеспечения устойчивости формоизменения за счет введения промежуточных термообработок между стадиями ступенчатой осадки или использования специализированного инструмента. Исследования течения металла на переходах высадки заготовок с $m_0 > 3,5$ в ручьях горизонтально-ковочных машин (ГКМ) проводили Е. И. Семенов, И. С. Зиновьев, А. Х. Грайфер, А. Г. Овчинников, А. Д. Томлёнов, Л. С. Зисерсон и др. При этом установлено, что изогнутая ось заготовки формируется в соответствии с механикой двусторонней заделки стержня, а величины критических отношений m_{kr} находятся в пределах от 2,5 до 3,76. Такой разброс связан с принятием разными авторами различных условий трения на контакте, состояния торца заготовки, характеристик кривой упрочнения деформируемого материала и др.

В условиях Херсонского завода карданных валов, по предложению К. К. Диамантопуло, явление продольного изгиба было использовано для рационализации технологии штамповки поковок с изогнутой осью [10]. Продольный изгиб, проводимый параллельными плитами, обеспечивает за один ход прессы сбив окалины, гибку и предпочтительное перераспределение металла по длине заготовки, что способствует благоприятному формообразованию поковок в штамповочных ручьях, а в некоторых случаях позволяет достичь экономии металла до 53 % на каждой поковке [2].

Продольный изгиб целесообразно рассматривать как совокупность одновременно происходящих процессов формообразования бокового профиля полуфабриката и изгиба заготовки (рис. 1). На основе использования метода смещенного объема успешно выполнена теоретическая оценка степени деформации, связанной с образованием профиля заготовок (появлением участков с максимальным D_{max} и минимальным D_{min} диаметром) при продольном изгибе [11]. Однако, для научно-обоснованного назначения технологических режимов профилирования также актуальным является выяснение картины деформаций, связанных с изгибом заготовки, т.е.

определение взаимосвязи радиуса кривизны, положения нейтрального слоя и деформации крайних волокон заготовки с технологическими режимами продольного изгиба.

Целью настоящей работы является развитие теоретических основ продольного изгиба с точки зрения определения закономерностей взаимосвязи радиуса кривизны, положения нейтрального слоя по биссектрисе угла изгиба и степеней деформации крайних волокон заготовки круглого поперечного сечения с технологическими параметрами профилирования.

Материалы исследования. Технологический параметр процесса, характеризующий рабочий ход инструмента, определяют как

$$\varepsilon_y = \frac{L_0 - H_k}{L_0} 100\% = \frac{\Delta H}{L_0} 100\%, \quad (1)$$

где H_k и ΔH – конечная высота заготовки после осадки с продольным изгибом заготовки и рабочий ход инструмента соответственно.

Схема нагружения при продольном изгибе соответствует гибке с приложением осевой сжимающей силы, действие которой приводит к тому, что волокна со стороны внешнего радиуса профилированной заготовки могут находиться в сжатом состоянии (рис. 2). Величины и знаки деформаций крайних волокон в поперечном сечении по биссектрисе угла изгиба заготовки, при прочих равных условиях, зависят от значений ε_y и m_0 .



Рис. 1 – Заготовки после продольного изгиба

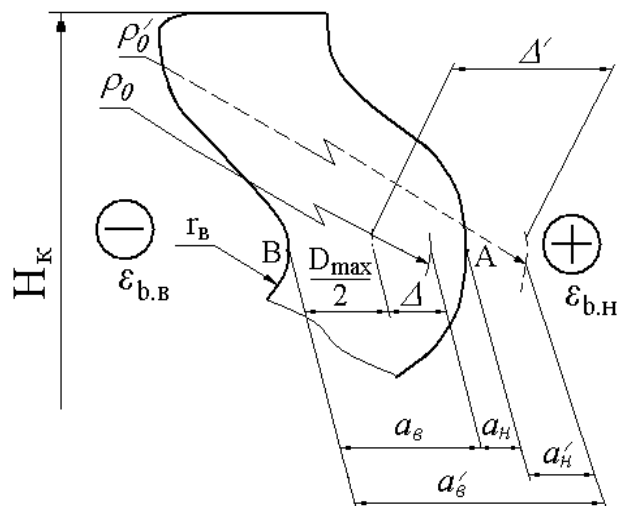


Рис. 2 – Схема к расчету деформаций крайних волокон при продольном изгибе

Степень деформации ε_b , характеризующую изгиб, т.е. состояние крайних волокон поперечного сечения заготовки по биссектрисе угла изгиба, можно определить на основании формулы [12–14]:

$$\varepsilon_b = y/\rho_0, \quad (2)$$

где y – расстояние до волокна от нейтральной линии, определяемой радиусом кривизны нейтрального слоя ρ_0 .

Для процессов гибки листового материала величину радиуса кривизны нейтрального слоя ρ_0 определяют по формулам В. П. Романовского и И. П. Ренне, приведенных, например, в источниках [12–14]:

$$\rho_0 = \left(\frac{r_b}{s} + \frac{\zeta}{2} \right) \cdot \zeta \cdot s \cdot \frac{b_{cp}}{b}, \quad (3)$$

где $\zeta = s_{ut}/s$ – коэффициент утонения материала, причем s и s_{ut} – толщина листового материала до и после гибки соответственно;

r_b – величина внутреннего радиуса при гибке;

b и b_{cp} – ширина полосы до гибки и средняя ширина полосы после гибки.

Тогда, применительно к процессу продольного изгиба, когда имеет место не утонение, а неравномерное утолщение поперечного сечения заготовки, формулу (3) преобразуем к относительному выражению:

$$\frac{\rho_0}{D_0} = \left(\frac{r_b}{D_0} + \frac{k_2}{2} \right) k_2 \frac{1}{2} (k_1 + k_2). \quad (4)$$

Для вычисления r_b/D_0 , $k_1 = D_{\min}/D_0$ и $k_2 = D_{\max}/D_0$ в результате обработки экспериментальных данных по продольному изгибу заготовок из неупрочняющегося материала (свинец, горячая деформация углеродистых сталей) получены следующие зависимости [15]:

$$\lg \left(\frac{r_b}{D_0} \right) = A_r \cdot m_0^3 + B_r \cdot m_0^2 + C_r \cdot m_0 + D_r, \quad (5)$$

где $A_r = 12,207 \cdot \varepsilon_y^3 - 14,193 \cdot \varepsilon_y^2 + 4,6031 \cdot \varepsilon_y - 0,6001$;

$B_r = -159,39 \cdot \varepsilon_y^3 + 187,01 \cdot \varepsilon_y^2 - 60,639 \cdot \varepsilon_y + 8,1419$;

$C_r = 684,87 \cdot \varepsilon_y^3 - 812,76 \cdot \varepsilon_y^2 + 264,59 \cdot \varepsilon_y - 37,055$;

$D_r = -1026,1 \cdot \varepsilon_y^3 + 1229,3 \cdot \varepsilon_y^2 - 408,34 \cdot \varepsilon_y + 59,923$,

$$k_1 = \frac{D_{\min}}{D_0} = A_d'' m_0^3 + B_d'' m_0^2 + C_d'' m_0 + D_d'', \quad (6)$$

где $A_d'' = 1,0677 \cdot \varepsilon_y^3 + 0,1951 \cdot \varepsilon_y^2 - 0,4685 \cdot \varepsilon_y + 0,0706$;

$B_d'' = -15,485 \cdot \varepsilon_y^3 - 3,415 \cdot \varepsilon_y^2 + 7,3915 \cdot \varepsilon_y - 1,0986$;

$$C_d'' = 72,358 \cdot \varepsilon_y^3 + 20,591 \cdot \varepsilon_y^2 - 38,95 \cdot \varepsilon_y + 5,667;$$

$$D_d'' = -108,82 \cdot \varepsilon_y^3 - 40,947 \cdot \varepsilon_y^2 + 68,253 \cdot \varepsilon_y - 8,6315,$$

$$k_2 = \frac{D_{\max}}{D_0} = A_d \cdot m_0^3 + B_d \cdot m_0^2 + C_d \cdot m_0 + D_d, \quad (7)$$

где $A_d = 0,7794 \cdot \varepsilon_y^3 - 0,6661 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,0898 \cdot \varepsilon_y - 0,0034;$

$$B_d = -11,432 \cdot \varepsilon_y^3 + 9,858 \cdot \varepsilon_y^2 - 1,526 \cdot \varepsilon_y + 0,0752;$$

$$C_d = 57,264 \cdot \varepsilon_y^3 - 50,311 \cdot \varepsilon_y^2 + 8,9265 \cdot \varepsilon_y - 0,514;$$

$$D_d = -97,215 \cdot \varepsilon_y^3 + 87,446 \cdot \varepsilon_y^2 - 16,713 \cdot \varepsilon_y + 2,0905.$$

Положение нейтральной линии в процессах с совместным действием сжатия и изгиба смещено в сторону растянутых волокон, где деформация обозначается со знаком «+» (см. рис. 2), т.е. зона сжатия в поперечном сечении заготовки является большей, чем зона растяжения. Со стороны сжатых волокон деформация обозначена «-». Величину смещения нейтрального слоя от центра поперечного сечения по биссектрисе угла изгиба обозначим через Δ , при этом:

$$\Delta = \rho_0 - r_b - \frac{D_{\max}}{2}, \quad (8)$$

или в относительном виде:

$$\frac{\Delta}{D_0} = \frac{\rho_0}{D_0} - \frac{r_b}{D_0} - \frac{k_2}{2}. \quad (9)$$

Обозначим через a_b и a_H расстояния от нейтральной линии до наружного (А) внутреннего (В) волокна по рассматриваемому поперечному сечению (см. рис. 2). При значительной доле деформации сжатия все поперечное сечение находится в области отрицательных деформаций, которые являются большими на внутреннем радиусе и меньшими на наружном. Тогда нейтральная линия условно выходит за пределы поперечного сечения на величину Δ' от центра (на рис. 2 её радиус кривизны обозначен как ρ_0'). Для данного случая расстояния от нейтральной линии до внутреннего и наружного волокна обозначены a_b' и a_H' соответственно. Следовательно, с сохранением отрицательного знака для сжатых волокон и положительного для случая наличия растянутых волокон, определим:

$$a_b' = a_b = (r_b - \rho_0); \quad (10)$$

$$a_H' = a_H = (r_b - \rho_0 + D_{\max}). \quad (11)$$

Или в относительном выражении:

$$(a_b / D_0) = (r_b - \rho_0) / D_0; \quad (12)$$

$$(a_H / D_0) = (r_b - \rho_0) / D_0 + k_2 \quad (13)$$

Тогда, согласно выражениям (2), (12) и (13) деформацию внутренних и наружных волокон находим соответственно:

$$\varepsilon_{b,b} = (a_b / D_0) / (\rho_0 / D_0); \quad (14)$$

$$\varepsilon_{b,H} = (a_H / D_0) / (\rho_0 / D_0). \quad (15)$$

Таким образом, разработана методика, позволяющая найти взаимосвязь величины относительного радиуса нейтрального слоя (ρ_0 / D_0), вычисляемого по формуле (4), значения относительного смещения нейтрального слоя (Δ / D_0), вычисляемого по формуле (9), и значений деформаций крайних волокон, вычисляемых по формулам (14) и (15), с основными технологическими параметрами продольного изгиба: ε_y и m_0 . Результаты выполненных расчетов приведены на рис. 3 и рис. 4 для величин $m_0 = 4,0; 5,0$ и $6,0$ при наиболее приемлемых значениях $\varepsilon_y = 20 \dots 50 \%$ ($\varepsilon_y = 0,2 \dots 0,5$).

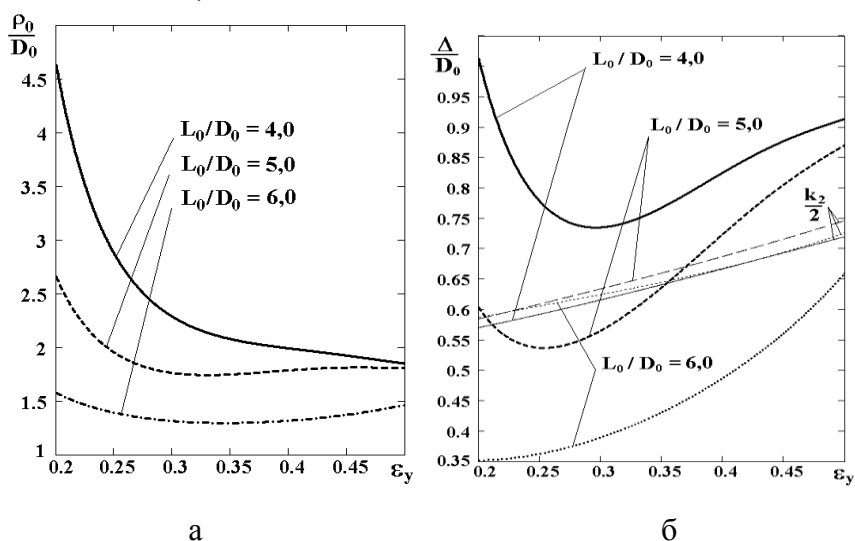


Рис. 3 – результаты выполненных расчетов: а – изменение относительного радиуса кривизны нейтрального слоя и б – изменение относительного смещения нейтрального слоя от центра поперечного сечения по биссектрисе угла продольного изгиба заготовки

С наступлением выпучивания и увеличением составляющей изгиба радиус кривизны нейтрального слоя заготовки уменьшается, причем у коротких заготовок ($m_0 = 4,0$) наступает более резкий переход от сжатия к изгибу, из-за чего значения (ρ_0 / D_0) резко снижаются (см. рис. 3,а). Относительное смещение нейтрального слоя (Δ / D_0) (см. рис. 3,б) свидетельствует о том, что

до $\varepsilon_y = 25...30\%$ доля составляющей изгиба является существенной, а дальнейший рост параметра ε_y приводит к возрастанию составляющей сжатия.

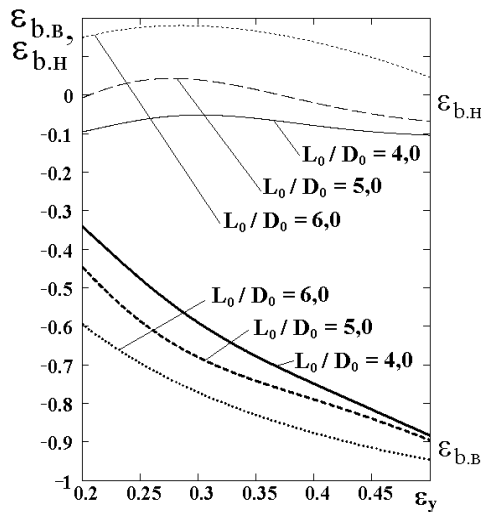


Рис. 4 – Взаимосвязь деформаций наружных и внутренних волокон заготовки с технологическими параметрами процесса профилирования продольным изгибом

При величинах $(\Delta/D_0) < k_2/2$ в поперечном сечении существует зона растяжения. Следовательно, по рис. 3, б, на протяжении исследованного диапазона $\varepsilon_y = 20...50\%$ у высоких заготовок с $m_0 = 6,0$ существует зона растяжения, у заготовок с $m_0 = 5,0$ зона растяжения появляется в диапазоне $\varepsilon_y = 22...35\%$, а заготовки с $m_0 = 4,0$ на протяжении всего деформирования находятся в области сжатия. Это также подтверждают расчеты, проведенные по формулам (14) и (15), результаты которых приведены на рис. 4.

Выводы. Разработана методика расчета и установлены закономерности изменения относительного радиуса кривизны нейтрального слоя, смещения нейтральной линии деформаций и развития деформаций на внутреннем и наружном радиусе по биссектрисе угла изгиба цилиндрической заготовки при продольном изгибе в зависимости от технологического параметра степени деформации ε_y и относительной высоты заготовки m_0 .

Список литературы: 1. Грайфер А. Х. Об устойчивости заготовок при осадке и высадке / А. Х. Грайфер // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 11. – С. 11–13. 2. Кухарь В. В. Малозатратные инновационные решения в технологии и оборудовании кузнечно-штамповочного производства / В. В. Кухарь // Металл и литье Украины. – 2008. – № 9. – С. 33–36. 3. Кухарь В. В. Формоизменение при профилировании продольным изгибом заготовок с различной формой поперечного сечения / В. В. Кухарь // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» / НТУУ «ХПІ». – К., 2010. – № 60. – С. 169–173. – (Машинобудування). 4. Кухарь В. В. Формообразование элементов трубопроводов продольным изгибом / В. В. Кухарь, А. В. Грушко // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 12. – С. 147–152. 5. Илюшкин М. В. Изготовление методом осадки в роликах перфорированных гнутых профилей уголкового типа / М. В. Илюшкин, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Формообразование гнутых профилей: теория и практика :

Сборник научных трудов / Под науч. ред. д-ра техн. наук, профессора В. И. Филимонова. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 159 с. – Режим доступа : <http://studik.net/izgotovlenie-metodom-osadki-v-rolikakh-perforirovannykh-gnutyx-profilej-ugolkovogo-tipa>. – Дата звернення : 30 жовтня 2014. **6.** Masuda M. Compression Bending / M. Masuda, Y. Tosava // Bull. Jap. Soc. precision Eng-ng. – 1963. – No 1. – P. 33–35. **7.** Goton Manabu. Elastic-plastic analysis of uni-lateral and bi-lateral compression of severe deformation on the basis of J2F and J2G / Goton Manabu, Shibata Yuji // Trans. Jap. Soc. Eng. A. – 1990. – No 56. – P. 529. **8.** Огородніков В. А. Відновлення деталей машин методом пластичної формозміни / В. А. Огородніков, В. Ф. Сердюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1996. – No 3. – С. 58–62. **9.** Хван Д. В. Осадка длинномерных заготовок как нетрадиционный способ обработки металлов давлением / Д. В. Хван, А. А. Воронаев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ-Хмельницький, 2002. – С. 143–147. **10.** Способ изготовления деталей типа поворотного кулака: а.с. 1612433 А1 СССР, МКИ В 21 К 1/08 / К. К. Диамантопуло, Ю. А. Смолиенко, О. Ю. Кумунджиева (СССР). – No 4449233/31-27; заявл. 23.05.88; опубл.16.06.91. **11.** Кухарь В. В. Смещенный объем и степень деформации при формообразовании профиля заготовки продольным изгибом / В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск, 2014. – No 1 (38). – С. 71–76. **12.** Зубцов М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – М.–Л.: Машгиз, 1958. – 459 с. **13.** Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – М.: Машиностроение, 1990. – 674 с. **14.** Лысов М. И. Формообразование деталей гибкой / М. И. Лысов, Н. В. Сосов. – М.: Машиностроение, 2001. – 388 с. **15.** Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки : монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. – Мариуполь: изд-во ЗАО «Газета «Приазовский рабочий», 2011. – 336 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Graifer, A. Kh. «Ob ustoichivosti zagotovok pri osadke i vysadke». *Kuznechno-shtampovochnoje ptiozvodstvo*, issue 11, 1970. 11–13. Print. **2.** Kukhar, V. V. «Malozatratnyje innovatsionnyje reshenija v tekhnologii i oborudovanii kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva». *Metall i litjo Ukrainy*, issue 9, 2008. 33–36. Print. **3.** Kukhar, V. V. «Formoizmenenije pri profilirovanii prodolnym izgiбом zagotovok s razlichnoj formoj poperechnogo sechenija». *Visnyk NTUU «KPI»*. Kiev, issue 60, 2010. 169–173. Print. **4.** Kukhar, V. V., Hrushko, A. V. «Formoobrazovaniye elementov truboprovodov prodol'nym izgiбом». *Zahyst metallurgijnykh machin ot polomok*, PDTU, Mariupol, issue 12, 2010. 147–152. Print. **5.** Iljushkin, M. V., Markovtsev V. A., Filimonov V. I. «Izgotovlenije metodom osadki v rolikakh perforirovanykh hnutyx profilej ugolkovogo tipa». *Formoobrazovaniye hnutyx profilej : teorija i praktika : Sbornik nauchnykh trudov*, Pod nach. red. prof. V. I. Filimonova. Uljanovsk : UIGTU. 2012. 159. Print. <<http://studik.net/izgotovlenie-metodom-osadki-v-rolikakh-perforirovannykh-gnutyx-profilej-ugolkovogo-tipa>>. Web. 30.10.2014. **6.** Masuda, M., Tosava Y. «Compression Bending». *Bull. Jap. Soc. precision Eng-ng*, issue 1, 1963. 33–35. Print. **7.** Goton Manabu, Shibata Yuji. «Elastic-plastic analysis of uni-lateral and bi-lateral compression of severe deformation on the basis of J2F and J2G». *Trans. Jap. Soc. Eng. A* issue 56, 1990. 529. Print. **8.** Ogorodnikov, V. A., Serdjuk, V. F. Vidnovlennja detalej mashin methodom plastychnoji formozminy. *Visnyk VPI*, issue 3, 1996. 58–62. Print. **9.** Khvan, D. V., Voropajev, A. A. «Osadka dlinnomernyh zagotovok kak netraditsionnyj method obrabotki davlenijem». *Udoskonalennja protsesiv i obladnannia obrobky tyskom v metalurgii i mashinobuduvanni : zb. nauk. pr.*, Kramators'k-Khmelnitskij, 2002. 143–147. Print. **10.** Diamantopulo, K. K., Smolijenko, Yu. A., Kumundzhijeva, O. Yu. «Sposob izgotovlenija detalej tipa povorotnogo kulaka». *A. s. 1612433 A1 SSSR*, MKI V 21 K 108, No. 444923331-27; zayav. 23.05.88; opubl.16.06.91. Print. **11.** Kukhar, V. V. «Smeshrnnij objom i stepen' deformatsii pri formoobrazovani profilja zagotovki prodolnym izgiбом». *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr.*, DGMA, Kramatorsk, issue 1 (38), 2014. 71–76. Print. **12.** Zubtsov, M. E. *Listovaja shtampovka*, Moscow.-Leningrad: Mashgiz, 1958. 459. Print. **13.** Romanovskij, V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke*, Moscow, Mashinostrojenije, 1990. 674. Print. **14.** Lysov, M. I., Sosov, N. V. *Formoobrazovaniye detalej gibkoj*, Moskva, Mashinostrojenije, 2001. 388. Print. **15.** Grinkevich, V. A., Kukhar, V. V., Krajev, M. V. Burko, V. A. *Analiz plastycheskogo formoizmenenija v chastnyh zadachakh kovki i shtampovki : monografija*, Mariupol, izd-vo ЗАО «Газета Приазовский рабочий», 2011. 336. Print.

Поступила (received) 22.10.2014